



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR  
BLDC MENGGUNAKAN METODE *FUZZY* - *PID*  
CONTROLLER UNTUK APLIKASI SEPEDA MOTOR  
LISTRIK**

Agus Try Wahyudi  
NRP 07111440000139

Dosen Pembimbing  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D  
Danar Fahmi, ST., MT

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR  
BLDC MENGGUNAKAN METODE *FUZZY* - *PID*  
*CONTROLLER* UNTUK APLIKASI SEPEDA MOTOR  
LISTRIK**

Agus Try Wahyudi  
NRP 07111440000139

Dosen Pembimbing  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D  
Danar Fahmi, ST., MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

***DESIGN AND SIMULATION SPEED CONTROL OF BLDC  
MOTOR USING FUZZY - PID METHODE FOR ELECTRIC  
MOTORCYCLE APPLICATIONS***

Agus Try Wahyudi  
NRP 07111440000139

Supervisor  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D  
Danar Fahmi, ST., MT

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE *FUZZY – PID CONTROLLER* UNTUK APLIKASI SEPEDA MOTOR LISTRIK” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juni 2018



Agus Try Wahyudi  
NRP. 07111440000139

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....



**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR  
BLDC MENGGUNAKAN METODE FUZZY – PID  
CONTROLLER UNTUK APLIKASI SEPEDA MOTOR  
LISTRIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing 1**



**Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.**  
**NIP. 198006032006041003**

**Dosen Pembimbing 2**



**Daniar Fahmi, ST., MT.**  
**NIP. 198909252014041002**



**JULI, 2018**

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

# **Desain dan Simulasi Kontrol Kecepatan Motor BLDC menggunakan Metode *Fuzzy* – PID Controller untuk aplikasi sepeda motor listrik**

Nama : Agus Try Wahyudi  
Pembimbing : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D  
Danar Fahmi, ST., MT

## **ABSTRAK**

Pemanasan global menjadi topik pembahasan yang sangat penting didalam pengendalian polusi akibat emisi kendaraan bermotor. Solusi yang sangat menjanjikan untuk dapat mengurangi permasalahan ini yaitu dengan segera beralih ke kendaraan listrik. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya sedang mengembangkan *Garasindo Electric Scooter ITS* (GESITS). Hal ini merupakan langkah nyata yang telah dirintis sejak tahun 1985. GESITS menggunakan penggerak berupa motor BLDC (*Brushless Direct Current motor*). Motor ini merupakan salah satu jenis motor yang mempunyai keandalan dan efisiensi yang tinggi, kinerja yang bagus serta torsi yang besar. Teknik pengemudiannya tidak begitu mudah karena diperlukan rangkaian elektronik yang lebih kompleks daripada menggunakan jenis motor yang lainnya. Untuk itu dalam penelitian ini, penulis mencoba untuk mendesain rangkaian kontrol motor BLDC dengan menggunakan *Fuzzy logic controller* (FLC), dimana kontroler ini dibuat agar dapat meningkatkan respons kecepatan yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler PID, sehingga mampu untuk mengatasi masalah – masalah pada sistem yang tidak linear.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada kecepatan 1000 RPM dengan beban 2 N.m *error steady state* dari *Fuzzy PID Controller* sebesar 0.005% dan *response time* sebesar 0.645 detik sedangkan kontroler PID sebesar 0.035% dengan *response time* sebesar 0.64536 detik. Ketika kecepatannya bervariasi kedua kontroler dapat mengikuti referensi yang diberikan, namun *error steady state* dari kontroler PID nilainya lebih besar daripada *Fuzzy – PID Controller*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kontroler *Fuzzy – PID* jauh lebih baik daripada kontroler PID.

Kata kunci : BLDC, *Fuzzy-PID Controller*, Kontrol PID, *Matlab-Simulink*.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

# **DESIGN AND SIMULATION SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR USING FUZZY - PID METHODE FOR ELECTRIC MOTORCYCLE APPLICATIONS**

*Name* : Agus Try Wahyudi  
*Supervisor* : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D  
Danar Fahmi, ST., MT

## **ABSTRACT**

*Global warming is becoming a very important discussion topic in the pollution control resulting from motor vehicle emissions. A very promising solution to this problem could reduce by immediately switching to electric vehicles. Ten November Institute of technology (ITS) Surabaya is developing Garasindo Electric Scooter ITS (GESITS). This is a real step that has pioneered since the year 1985. GESITS use the activator in the form of motor BLDC (Brushless Direct Current motor). This bike is one type of motor that has the reliability and high efficiency, good performance and torque. The technique of pengemudiannya is not so easy because of the required electronic circuits is more complex than using this type of motor. For that in this study, the authors try to design a series of motor control BLDC by using Fuzzy logic controller (FLC), where the controller has been created in order to increase the response speed is better compared to the controller of PID, so being able to resolve the problem – a problem on systems that are not linear.*

*From the results obtained by simulation at a speed of 1000 RPM with a load of 2 N. m steady state error of a Fuzzy PID Controller of 0,005% and a response time of 0.645 seconds while controller of PID 0.0035% with response time of 0.64536 seconds. When its velocity varies both controllers can follow the references provided, but steady state error of a PID controller value is greater than the Fuzzy PID Controller. So it can be inferred that the Fuzzy PID controller – much better than controllers PID.*

**Keywords:** BLDC, Fuzzy-PID Controller, PID Control, Matlab-Simulink.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadiran Allah SWT serta tidak lupa sholawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga penelitian dalam tugas akhir ini bisa berjalan lancar dan selesai tepat pada waktunya.

Bismillahirrohmanirrohim. Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Subhanahu Wata'ala, yang telah menciptakan langit dan bumi, dan Maha Mengetahui segalanya, Sang pemilik lautan ilmu seluruhnya. Alhamdulillah, atas bimbingan dan karunia-Nya, pada akhirnya tugas akhir tentang kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan *Fuzzy – PID Controller* telah diselesaikan. Semoga hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan dan bisa diimplementasikan untuk kendaraan listrik Indonesia. Sholawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad Shollallahu 'Alaihi Wasallam yang telah menunjukkan jalan yang lurus dan terang benderang bagi seluruh alam.

Terimakasih dan tak lupa rasa syukur penulis yang tak ternilai kepada kedua orang tua, Bapak Moh. Nurullah dan Ibu Sitti Nurlela, yang telah membesarkan dan membimbing hingga dewasa, Terimakasih do'anya disetiap waktu. Teruntuk anggota keluarga penulis, Mbak Uus, Mas Arif dan Dek Dika, semoga Allah Subhanahu Wata'ala senantiasa memberikan rahmat dan perlindungan-Nya sehingga apa yang dicita-citakan dapat terwujud.

Terimakasih juga penulis sampaikan kepada dosen pembimbing, Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D, Bapak Daniar Fahmi, ST., MT., Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. serta pembimbing lapangan di GESITS, Mas Ridwan yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk membimbing dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Elektro ITS, Khususnya seluruh dosen bidang studi Teknik Sistem Tenaga yang telah memberikan ilmunya, baik ilmu teknik maupun ilmu kehidupan serta dorongan semangat dan motivasi yang selalu beliau –beliau sampaikan dalam perkuliahan.

Tidak lupa juga ucapan terimakasih penulis kepada teman-teman S1 khususnya angkatan e54, elektro 2014. Terimakasih atas 4 tahun bersamanya. Semoga cita-cita tak hanya sebatas angan, tapi dalam gengaman tangan.

Untuk keluarga e54 asli madura, Icing (0711144000157), Qori' (0711144000141), Jepik(0711144000053), teman seperjuangan yang tak mengenal lelah demi tercapainya cita-cita, semoga selalu mendapatkan rahmat dan karunia Allah Subhanahu Wata'ala serta selalu dalam perlindungan –Nya.

Sahabat spesial yang sekaligus telah menjadi bagian dari keluarga penulis, “Pascal Surabaya”, aik, ansori, ardi, elman, dulhak, tika, malik, elsa, fitri, nunung, iim, lina, rista, uyung, qori', risky dan rofik, mudah – mudahan Allah Subhanahu Wata'ala selalu mempererat tali persaudaraan kita, terkabul cita-cita dan selalu dalam perlindungan dan rahmat-Nya.

Semoga Allah Subhanahu Wata'ala senantiasa memberikan rahmat, petunjuk dan perlindungan-Nya bagi kita semua. Aamiin.

Surabaya, 4 Juni 2018

Agus Try Wahyudi



## DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL .....	i
LEMBAR KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah .....	2
1.5. Metodologi Penelitian .....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
1.7. Relevansi.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Motor BLDC .....	5
2.1.1. Jenis Rotor <i>Brushless DC</i> Tiga Fasa .....	6
2.1.2. <i>Hall Effect Sensor</i> Motor <i>Brushless DC</i> Tiga fasa .....	6
2.2. Model Matematika Motor BLDC.....	10
2.3. Karakteristik Respons Sistem.....	13
2.4. Kontrol Arus <i>Hysteresis</i> .....	14
2.5. Kontrol Kecepatan Motor BLDC .....	15
2.5.1. Kontroler PID .....	15
2.4.1.1. Kontroler P.....	16
2.4.1.2. Kontroler I .....	16
2.4.1.3. Kontroler D.....	17
2.5.2. Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> .....	17
2.5.2.1. Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	17
2.5.2.2. Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i> .....	18
2.5.2.3. Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	19
2.5.2.4. Sistem Kontrol <i>Fuzzy</i> .....	20
2.6. Penelitian Sebelumnya .....	22

BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	23
3.1. Blok Diagram Keseluruhan Sistem.....	23
3.2. Perancangan Simulasi Motor BLDC.....	23
3.2.1. Blok Motor BLDC.....	24
3.2.2. Parameter Motor BLDC .....	24
3.3. Perancangan <i>Hysteresis Current Control</i> (HCC).....	25
3.4. Perancangan Kontrol Kecepatan.....	25
3.4.1. Perancangan Kontrol PID.....	25
3.4.2. Perancangan <i>Fuzzy-PID Controller</i> .....	26
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS.....	33
4.1. Simulasi sistem <i>Open Loop</i> Motor BLDC.....	33
4.2. Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC dengan.... Metode <i>PID Controller</i> .....	35
4.3. Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC .....	36
dengan Metode <i>Fuzzy-PID</i> .....	36
4.3.1. Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap .....	36
dan Berbeban .....	36
4.3.2. Simulasi dengan Kecepatan Referensi .....	38
Berubah dan Berbeban.....	38
4.3.3. Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap .....	40
dan Beban Berubah.....	40
BAB V PENUTUP .....	43
5.1. Kesimpulan.....	43
5.2. Saran .....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN .....	47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis rotor <i>brushless</i> .....	6
Gambar 2. 2 Mekanisme <i>six step Brushless DC</i> .....	9
Gambar 2. 3 Pengaruh <i>hall sensor</i> pada <i>back – emf</i> tiap fasa .....	10
Gambar 2. 4 Rangkaian ekuivalen motor DC .....	11
Gambar 2. 5 Respons Orde Pertama .....	13
Gambar 2. 6 Prinsip kerja <i>Hysteresis Current Control</i> .....	14
Gambar 2. 7 Diagram Blok Kontroler PID .....	15
Gambar 2. 8 Fungsi Keanggotaan Segitiga .....	18
Gambar 2. 9 Fungsi Keanggotaan Trapesium .....	19
Gambar 2. 10 Sistem Kontrol <i>Fuzzy</i> .....	21
Gambar 3. 1 Blok Simulasi Sistem .....	23
Gambar 3. 2 Blok Motor BLDC .....	24
Gambar 3. 3 Blok <i>Hysteresis Current Control</i> .....	25
Gambar 3. 4 Kontroler PID .....	25
Gambar 3. 5 Struktur Kontroler <i>Fuzzy – PID</i> .....	26
Gambar 3. 6 Subsistem Blok PID .....	26
Gambar 3. 7 Respons Sistem .....	27
Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan dari <i>input Fuzzy – PID</i> (a) <i>error</i> , (b) <i>delta error</i> .....	28
Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan dari <i>output Fuzzy – PID</i> (a) <i>Fuzzy-P</i> (b) <i>Fuzzy-I</i> (c) <i>Fuzzy-D</i> .....	31
Gambar 4. 1 Respons kecepatan motor BLDC sistem <i>open loop</i> .....	33
Gambar 4. 2 (a) Arus fasa stator-a (b) Torsi Elektromagnetik Motor BLDC .....	34
Gambar 4. 3 Respons Kecepatan motor BLDC dengan menggunakan kontrol PID .....	35
Gambar 4. 4 (a) Arus fasa stator-a (b) Torsi Elektromagnetik Motor BLDC dengan metode <i>PID Controller</i> .....	36
Gambar 4. 5 Respons kecepatan dengan referensi tetap dan dengan beban 0.1 N.m .....	37
Gambar 4. 6 (a)Torsi dan (b) arus saat kecepatan tetap dengan beban 2 N.m.....	38
Gambar 4. 7 Respons kecepatan dengan kecepatan referensi berubah .....	38
Gambar 4. 8 (a) arus dan (b) torsi saat kecepatan bervariasi.....	39

Gambar 4. 9 Respons Kecepatan terhadap perubahan beban.....	40
Gambar 4. 10 (a) Perubahan beban dan arus stator fasa-a dan (b) torsi saat beban bervariasi .....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Motor BLDC GESITS.....	24
Tabel 3. 2 Parameter <i>Rating</i> Motor BLDC.....	24
Tabel 3. 3 Aturan inferensi <i>Fuzzy</i> untuk - P.....	29
Tabel 3. 4 Aturan inferensi <i>Fuzzy</i> untuk – I .....	29
Tabel 3. 5 Aturan inferensi <i>Fuzzy</i> untuk - D.....	30

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Seiring berkembangnya isu pemanasan global, maka penggunaan kendaraan listrik (*Electric Vehicle* (EV)) mulai diperhatikan. Hal ini terjadi karena kendaraan listrik menawarkan solusi yang paling menjanjikan untuk mengurangi emisi kendaraan khususnya di daerah perkotaan[1][2]. Saat ini Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya sedang mengembangkan *Garasindo Electric Scooter ITS* (GESITS). GESITS merupakan salah satu produk unggulan Indonesia yang dikembangkan oleh ITS Surabaya dan PT. Garasindo. GESITS mampu menjawab permasalahan lingkungan yang sekarang kondisinya makin turun akibat penggunaan bahan bakar minyak (BBM) oleh kendaraan bermotor.

Komponen utama dari kendaraan listrik adalah motor dan kontroler, dua bagian ini sangat potensial sehingga diperlukan *Research and Development* (R&D) untuk menjamin keandalan dan efisiensinya [3][4]. Motor listrik yang digunakan pada kendaraan listrik pada umumnya menggunakan jenis *Permanen Magnet Brushless Direct Current* (BLDC) motor. Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor yang mempunyai keandalan dan efisiensi yang tinggi, kinerja yang bagus serta torsi yang besar. Oleh karena itu, GESITS menggunakan motor BLDC dengan kapasitas sebesar 5 kW.

Motor BLDC memerlukan sistem kontrol agar bisa bekerja dengan baik serta menghasilkan torsi dan kecepatan yang diinginkan. Sistem kontrol PID (*Proportional, Integral, Derivative*) telah banyak digunakan di dunia industri dan peralatan elektronik, bahkan sekarang penggunaannya telah mencapai 90 %. Penyebabnya karena kontroler PID memiliki struktur yang sederhana, mampu bekerja dengan baik dan mudah diimplementasikan [5]. Disamping kelebihan, kontroler PID juga memiliki kekurangan salah satunya yaitu tidak mampu menangani masalah-masalah dengan parameter yang tidak pasti (tidak linear), seperti adanya perubahan beban. Maka parameter penguatan PID harus disesuaikan lagi. Hal inilah yang mendorong penulis untuk melakukan strategi tuning PID dengan cara yang modern sehingga permasalahan kontroler PID biasa dapat diminimalkan.

*Fuzzy logic controller* (FLC) adalah salah satu metode kontrol modern yang telah terbukti mampu untuk mengatasi masalah – masalah pada sistem yang tidak linear, yaitu dengan melakukan penyesuaian aturan-aturan *Fuzzy* dari data masukan dan keluaran. Sehingga parameter penguatan seperti *gain proporsional* ( $K_p$ ), *gain integral* ( $K_i$ ), *gain derivatif* ( $K_d$ ), dapat diperbarui untuk mendapatkan respons dinamik yang lebih baik[6][7].

Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan riset tentang desain dan simulasi sistem kontrol kecepatan motor BLDC 5kW yang digunakan oleh GESITS. Metode kontrol kecepatan yang digunakan yaitu metode *Fuzzy – PID Controller*.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengatur kecepatan motor BLDC dengan menggunakan *Fuzzy-PID Controller* agar dapat memperoleh respons dinamik yang baik sehingga dapat mengatasi perubahan variasi pembebanan. Skema permasalahan yang dibahas meliputi pemodelan motor BLDC, estimasi parameter (torsi, arus dan kecepatan), *hysteresis current control* dan desain *Fuzzy-PID Controller*.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mendesain kontroler untuk pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan metode *Fuzzy–PID Controller*. Sistem keseluruhan terdiri dari : pemodelan motor BLDC, estimasi parameter (torsi, arus dan kecepatan), *hysteresis current control* dan desain *Fuzzy-PID Controller*.

## **1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

- a. Menggunakan parameter motor BLDC GESITS 5 kW
- b. Nilai Resistansi dan Induktansi tiap fasa sama
- c. Variasi kecepatan mulai dari 500 RPM sampai 3500 RPM
- d. Variasi pembebanan mulai dari 2 N.m sampai 8 N.m
- e. Tuning dari kontrol PID menggunakan trial and error
- f. Fungsi keanggotaan dari *Fuzzy – PID* mengacu pada parameter kontrol PID yang selanjutnya akan disempurnakan



## 1.5. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini, terbagi kedalam 5 tahapan yaitu :

### 1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi secara lengkap mengenai motor BLDC dan teknik kontrolnya, baik melalui paper, jurnal, artikel, buku yang bertaraf nasional dan internasional, serta dari hasil konsultasi dengan dosen pembimbing dan pembimbing lapangan di GESITS. Sumber rujukan utama penulis yakni *IEEE Explore*.

### 2. Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem berdasarkan desain yang telah dibuat ketika studi literatur dengan menggunakan *software* matlab. Perancangan sistem meliputi pemodelan motor BLDC, *hysteresis current controller* dan perancangan *Fuzzy-PID Controller*.

### 3. Pengujian Simulasi

Setelah keseluruhan sistem telah saling terintegrasi, maka dilakukan pengujian terhadap respons kecepatan motor BLDC dengan beberapa variasi pembebanan. Penulis membandingkan antara *PID Controller* biasa dengan *Fuzzy-PID Controller*.

### 4. Analisa dan Evaluasi

Analisa dilakukan terhadap hasil simulasi, sehingga diketahui bahwa *Fuzzy-PID Controller* lebih baik dari pada *PID Controller* biasa. Ada 3 bagian yang akan dianalisa, yaitu simulasi dengan kecepatan referensi tetap dengan beban kecil ( $T_m = 0.1 \text{ N.m}$ ), simulasi dengan kecepatan referensi berubah dengan beban kecil ( $T_m = 0.1 \text{ N.m}$ ) dan simulasi dengan kecepatan referensi tetap dengan beban berubah.

### 5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Tahap penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari proses pengerjaan tugas akhir ini. Laporan berisi seluruh hal yang berkaitan dengan tugas akhir yang telah dikerjakan yaitu meliputi pendahuluan, studi literatur, tinjauan pustaka, perancangan sistem, pengujian dan analisa, serta penutup.

## 1.6. Sistematika Penulisan

Pada tugas akhir ini, sistematika penulisan dibagi menjadi lima bab, yaitu :

- **BAB I : Pendahuluan**  
Membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- **BAB II : Tinjauan Pustaka**  
Bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang terkait maupun yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Dasar teori yang menunjang meliputi konsep motor BLDC, teori *hysteresis current control* dan teori *Fuzzy-PID Controller*.
- **BAB III : Perancangan Sistem**  
Bab ini membahas tentang perencanaan sistem motor BLDC. Perancangan *hysteresis current control*, serta perancangan algoritma *Fuzzy-PID Controller* untuk pengaturan kecepatan motor BLDC berdasarkan teori pada bab 2.
- **BAB IV : Pengujian dan Analisis**  
Bab ini menjelaskan tentang hasil simulasi sistem kontrol pada sistem beserta analisisnya.
- **BAB V : Penutup**  
Pada bab ini diuraikan tentang kesimpulan akhir dari penelitian ini dan saran-saran mengenai kemungkinan pengembangan penelitian ini.

## 1.7. Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi perencanaan desain kontrol kecepatan *Fuzzy-PID*, pengembangan, dan perbandingan metode kontrol yang tepat untuk motor BLDC dimasa mendatang khususnya pada sepeda motor GESITS.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Motor BLDC**

Motor BLDC adalah turunan dari motor DC yang paling umum digunakan, yaitu motor DC dengan sikat. Motor BLDC memiliki kurva karakteristik torsi dan kecepatan yang sama. Perbedaan utama antara keduanya adalah pada penggunaan sikatnya, motor BLDC tidak memiliki sikat dan harus terkomutasi secara elektronik, hal inilah yang membuat nilai efisiensi dari motor BLDC sangat tinggi karena tidak adanya gesekan yang ditimbulkan antara sikat dengan motor. Selain itu motor BLDC mempunyai kinerja yang bagus, torsi yang besar, keandalan yang tinggi dan biaya perawatan yang murah. Sehingga dikatakan dalam sebuah studi bahwa motor BLDC merupakan motor yang paling cocok digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik [8] [9].

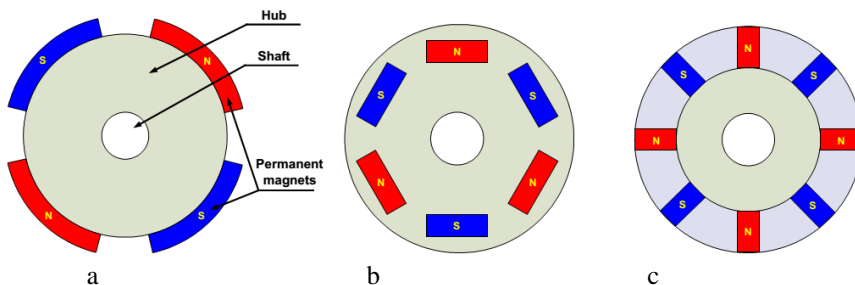
Berdasarkan jumlah fasenya, motor *brushless DC* dibagi menjadi tiga golongan, satu fasa, dua fasa dan tiga fasa. Jenis yang paling banyak digunakan dalam skala industri maupun rumah tangga adalah *brushless DC* satu fasa dan *brushless DC* tiga fasa. Rotor dari motor *brushless DC* merupakan magnet permanen. Motor *brushless DC* satu fasa memiliki satu belitan stator sedangkan motor *brushless DC* tiga fasa memiliki tiga belitan stator yang dihubungkan *we* (Y). Motor *brushless DC* juga dapat digolongkan berdasarkan jenis belitan statornya. Ada dua jenis belitan stator yaitu trapezoidal dan sinusoidal yang mengacu pada bentuk sinyal *Back Electromotive Force* (BEMF). Bentuk BEMF ditentukan oleh bentuk interkoneksi kumparan dan jarak air gap-nya. Selain itu bentuk arusnya juga mengikuti bentuk *sinusoidal* ataupun *trapezoidal*. Motor jenis sinusoidal memiliki karakteristik torsi yang lebih halus namun membutuhkan belitan yang lebih banyak dibandingkan tipe *trapezoidal*.

Rotor motor *brushless DC* terdiri dari sebuah *shaft* dan *hub* dengan magnet permanen yang disusun dua hingga delapan pasang. *Brushless DC* tiga fasa beroperasi dengan memanfaatkan tarikan dan tolakan kutub-kutub magnet. Ketika arus melalui salah satu dari ketiga fasa, maka akan menghasilkan medan magnet dan menarik medan magnet permanen (rotor) yang memiliki polaritas yang berbeda. Sehingga rotor akan bergerak sesuai dengan arah medan statornya. Perubahan medan magnet stator akan menyebabkan rotor bergerak mengikuti statornya

secara konstan. Torsi yang dihasilkan bergantung dari besar arus dan jumlah belitan pada statornya, kekuatan medan magnet permanen, *air gap* diantara rotor dan stator, maupun panjang lengan magnet permanennya.

### 2.1.1. Jenis Rotor *Brushless DC* Tiga Fasa

Apabila dilihat dari segi suplai pada terminalnya, motor *brushless DC* tergolong jenis motor DC. Namun, apabila dilihat dari konstruksinya, *brushless DC* tidak bisa digolongkan kedalam motor DC. Ada beberapa jenis motor *brushless DC* berdasarkan bentuk rotornya seperti *surface-mounted*, *embedded*, dan *inserted*. Berikut merupakan klasifikasi motor listrik *brushless DC* berdasarkan rotornya.



**Gambar 2. 1** Jenis rotor *brushless*. [13]

*Surface-mounted* (gambar 2.1 a) merupakan jenis motor *brushless DC* dengan rotor yang terletak diluar dari *hub* dan *shaft motor*. *Embedded* (gambar 2.1 b) merupakan *brushless DC* yang memiliki letak rotor yang menyatu dengan *hub*. Sedangkan *inserted* (gambar 2.1 c) memiliki karakteristik rotor yang disisipkan di dalam *hub*.

### 2.1.2. *Hall Effect Sensor Motor Brushless DC* Tiga fasa

Motor *brushless DC* menggunakan *switch* sebagai media komutasinya. *Switch* yang membuka dan menutup pada VSI akan menyebabkan arus mengalir pada stator motor *brushless DC*. Arus yang melewati kumparan pada stator akan menimbulkan medan magnet.

$$B = \frac{\mu NI}{2l} \quad (2.1)$$

N = Jumlah lilitan

I = Arus (A)

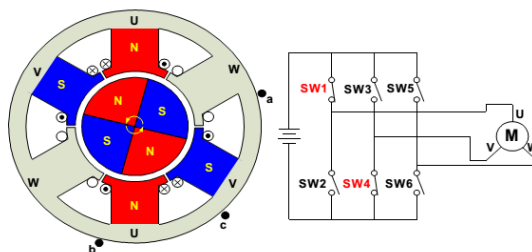
$l$  = Panjang lilitan  
 $\mu$  = Permeabilitas bahan

Permeabilitas bahan didapat dari kurva B-H. Gradien (kemiringan) dari kurva B-H dinamakan *permeabilitas differensial relative*. Berikut persamaan permeabilitas :

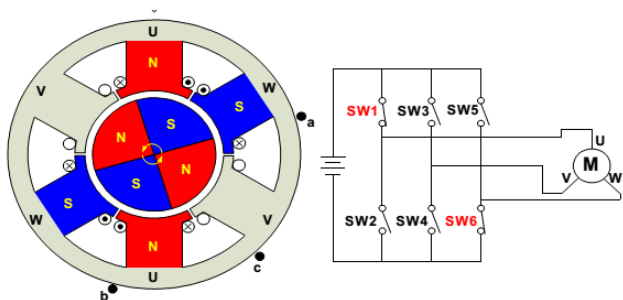
$$\mu_a = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2.2)$$

$\mu_a$  = Koefisien permeabilitas bahan  
 $\mu_0$  = Konstanta permeabilitas  
 $B$  = Medan magnet  
 $H$  = Intensitas medan magnet

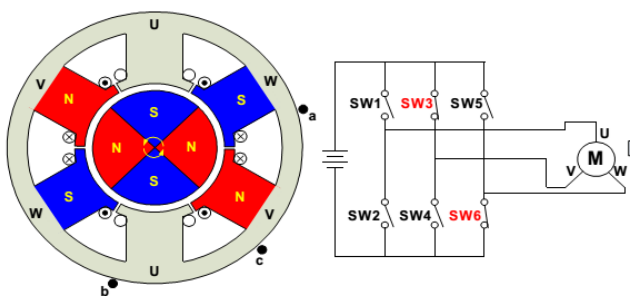
Pada umumnya *switch* bagian atas dikontrol menggunakan *sensor hall* yang ada pada motor *brushless DC*. Untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat, motor *brushless DC* memerlukan tiga buah *sensor hall* atau *encoder*. Penerapan *sensor hall* lebih luas karena dapat digunakan pada motor dengan jumlah *pole* yang berbeda. Kelemahan dari *sensor hall* adalah rentan terjadi kesalahan penentuan *timing* komutasi sehingga tidak didapatkan enam kombinasi *timing* yang berbeda. Motor *brushless DC* tiga fasa membutuhkan *sensor Hall* sebagai pendeteksi posisi rotor. Ketiga sensor hall (a,b,c) terpasang pada stator dengan interval 120 derajat. Setiap 60 derajat putaran, satu sensor hall mengubah state (keadaannya) nya. Sehingga dibutuhkan enam tahapan untuk melakukan satu siklus putaran penuh. Mekanisme perubahan *switch* yang terjadi akibat sensing dari *hall sensor* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



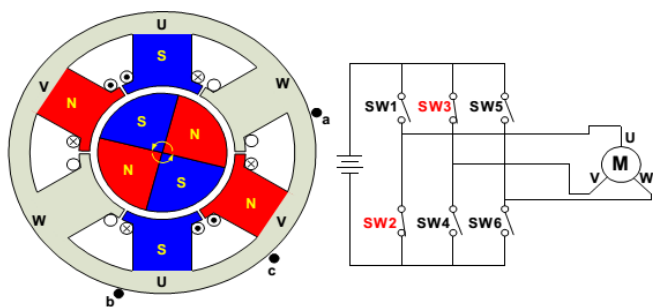
Hall sensor value: abc=001



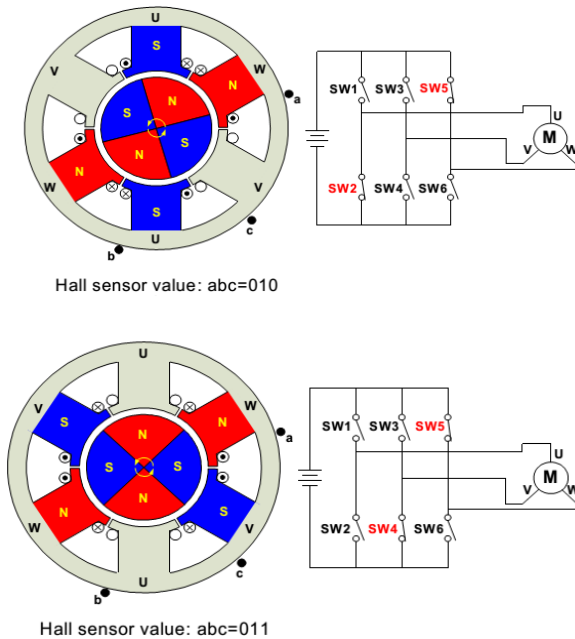
Hall sensor value: abc=101



Hall sensor value: abc=100



Hall sensor value: abc=110

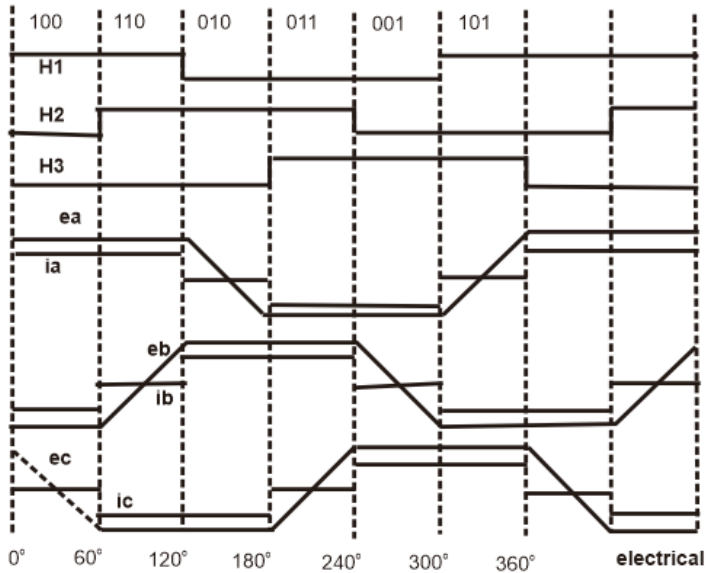


**Gambar 2. 2** Mekanisme *six step Brushless DC* [13].

Pada tahap pertama nilai yang terbaca pada sensor adalah 001 sehingga rangkaian logika yang telah didesain memerintahkan *switch* 1 dan *switch* 4 untuk *high*. Ketika sensor memiliki *state* (keadaan) 101, rangkaian logika memerintahkan *switch* 1 dan *switch* 6 untuk *high*. Begitupun seterusnya hingga enam tahap untuk melakukan satu putaran penuh.

*Six step* merupakan metode inversi kedalam bentuk *trapezoid*, *square*, atau menyerupai *sinusoidal*. *Six step* bekerja setiap 60 derajat perubahan posisi pada stator. Ketika rotor bergerak pada posisi 0 derajat hingga 60 derajat, *sensor hall* “a” memberikan sensing nilai 1, *sensor hall* “b” memberikan sensing nilai 0 dan *sensor hall* “c” memberikan sensing nilai 1. Keadaan ini mengakibatkan fase A bernilai positif, fase B bernilai negatif dan fase c dalam keadaan *floating*. Sehingga aliran arus mengalir dari fasa A menuju fasa B. Begitu seterusnya rangkaian *encoder* mengatur aliran arus yang masuk ke stator motor *brushless DC*

sehingga berputar secara konstan.



**Gambar 2. 3** Pengaruh *hall sensor* pada *back – emf* tiap fasa

## 2.2. Model Matematika Motor BLDC

Pemodelan motor BLDC dalam bentuk rangkaian ekuivalen dilakukan untuk memudahkan perhitungan. Gambar 2.4 R dan L masing-masing adalah nilai resistansi dan induktansi dari kumparan, sedangkan e adalah tegangan BEMF. Persamaan motor DC dapat dituliskan sebagai berikut :

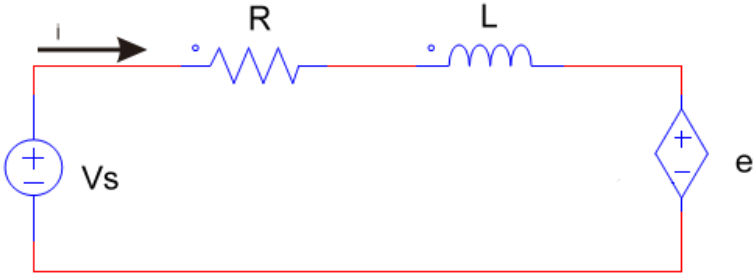
$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.3)$$

$$T_e = \beta \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2.4)$$

Pada persamaan diatas,  $V_s$  merupakan sumber tegangan DC dan  $i$  adalah arus yang mengalir pada kumparan (*armature current*).  $T_e$  dan  $T_L$  masing-masing adalah torsi listrik dan beban mekanis, sedangkan



$\beta, J, \omega_m$  adalah konstanta gesekan, inersia motor dan kecepatan angular rotor.



**Gambar 2. 4** Rangkaian ekuivalen motor BLDC

Motor BLDC memiliki belitan 3 fasa pada stator, sehingga persamaan motor BLDC dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2.5)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + (e_b - e_c) \quad (2.6)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + (e_c - e_a) \quad (2.7)$$

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + \beta \omega_m + T_L \quad (2.8)$$

$v$ ,  $i$  dan  $e$  masing – masing menunjukkan tegangan antar fasa, arus fasa, dan tegangan BEMF pada masing-masing fasa a,b, dan c.  $R$  dan  $L$  merupakan nilai resistansi dan induktansi pada belitan masing-masing fasa.  $T_{em}$  dan  $T_L$  menunjukkan torsi *electromotive* dan torsi beban pada motor.  $J$  adalah momen inersia,  $\beta$  adalah konstanta gesekan dan  $\omega_m$  adalah kecepatan rotor.  $T_{em}$  adalah total torsi *electromotive* hasil penjumlahan dari torsi masing-masing fasa.

$$T_{em} = \sum_{k=a,b,c}^n T_{em,k} \quad (2.9)$$

Torsi yang dihasilkan di masing-masing fasa dan tegangan BEMF

dirumuskan pada persamaan (2.10) dan (2.11).

$$T_{em,k} = i_k \cdot k_{T,k}(\theta_e) \quad (2.10)$$

$$e_k = k_{e,k}(\theta_e) \cdot \omega_m \quad (2.11)$$

$k_{T,k}(\theta_e)$  dan  $k_{e,k}(\theta_e)$  adalah konstanta torsi dan konstanta BEMF pada masing-masing fasa yang nilainya berubah berdasarkan fungsi dari posisi rotor. Dengan asumsi bahwa nilai  $k_{T,k}(\theta_e)$  dan  $k_{e,k}(\theta_e)$  adalah sama pada masing-masing fasa, maka persamaan tegangan BEMF dan torsi dapat dituliskan.

$$e_a = k_e f(\theta_e) \cdot \omega_m \quad (2.12)$$

$$e_b = k_e f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \omega_m \quad (2.13)$$

$$e_c = k_e f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \omega_m \quad (2.14)$$

$$T_{em} = k_T [i_a f(\theta_e) + i_b f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right)] \quad (2.15)$$

$\theta_e$  merupakan sudut elektrik rotor, yang besarnya adalah hasil kali antara posisi mekanik rotor dengan jumlah pasang kutub-kutubnya ( $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$ ).  $f(\theta_e)$  adalah fungsi dari bentuk *trapezoidal* tegangan BEMF.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 < \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ -\frac{6}{\pi} \theta_e + 5 & \frac{2\pi}{3} < \theta_e < \pi \\ \frac{6}{\pi} \theta_e & \pi < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (2.16)$$

Agar dapat direpresentasikan dalam bentuk *state space*, maka persamaan (2.5) – (2.7) perlu dimodifikasi. Dengan membuang satu persamaan dan mengeliminasi satu variabel dengan persamaan arus.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.17)$$

Maka persamaan tegangan antar fasa menjadi :

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2.18)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + (e_b - e_c) \quad (2.19)$$

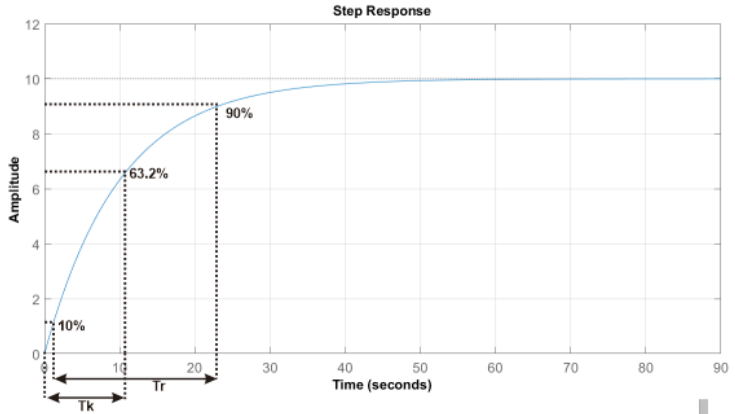
Dengan demikian, didapatkan model *state space* untuk motor BLDC sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -B/J & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2/3L & 1/3L & 0 \\ -1/3L & 1/3L & 0 \\ 0 & 0 & 1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

## 2.3. Karakteristik Respons Sistem

Terdapat beberapa macam ukuran kualitas respons transien yang lazim digunakan. Pada penelitian ini menggunakan respons orde pertama.



**Gambar 2. 5** Respons Orde Pertama

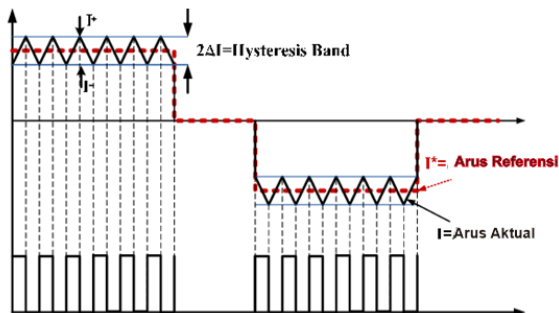
Berikut penjelasan grafik respons pada gambar 2.5 :

- Time Constant* ( $\tau$ ) : ukuran waktu yang menyatakan kecepatan respons *transient* yang diukur mulai  $t = 0$  s/d respons mencapai 63,2% dari respons *steady state*.
- Rise Time* ( $T_r$ ) : Ukuran waktu yang menyatakan keberadaan suatu respons, yang diukur mulai 10% s/d 90% atau dapat pula dari 5% s/d 95% dari respons *steady state*.
- Error Steady State* : Besarnya kesalahan saat *steady state*. Caranya dengan menggunakan selisih antara nilai akhir dan nilai referensi setelah itu dibagi dengan nilai referensi dan dikalikan dengan 100 %.

## 2.4. Kontrol Arus *Hysteresis*

Kontrol arus *hysteresis* atau *Hysteresis Current Control* (HCC) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatur kondisi pensaklaran inverter 3 fasa. Tujuan dari metode ini adalah mengatur arus output inverter agar mengikuti arus referensi yang diberikan. Teknik kontrol secara umum ada beberapa macam, seperti *linear control*, *hysteresis control*, dan *predictive control*. Dalam penelitian ini, penulis hanya akan membahas *Hysteresis Current Control* [10].

Metode *Hysteresis Current Control* tidak menggunakan gelombang *sawtooth* seperti model yang lain. sebagai penggantinya, metode ini menggunakan arus referensi dan arus aktual. Dimana diharapkan arus aktual secara terus menerus dapat mengikuti arus referensi didalam sebuah *hysteresis band*.



Gambar 2. 6 Prinsip kerja Hysteresis Current Control

Gambar 2.6 memperlihatkan prinsip kerja HCC dengan pengaturan arus dimana rangkaian kontrol membentuk gelombang referensi arus kotak-kotak . ketika arus mencapai nilai *hysteresis band* yang diberikan, saklar bagian atas akan berada pada kondisi tidak aktif, sedangkan saklar bagian bawah dalam kondisi tidak aktif.

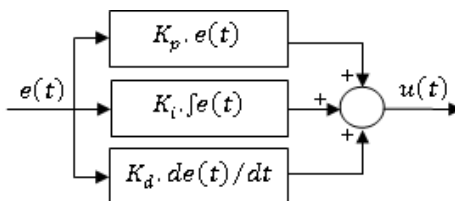
## 2.5. Kontrol Kecepatan Motor BLDC

### 2.5.1. Kontroler PID

Kontroler PID merupakan kontroler yang banyak digunakan di industri. Hal ini dikarenakan kemudahan penggunaannya terutama pada segi perhitungan. Kontroler PID melakukan mekanisme kontrol melalui selisih antara masukan dengan nilai keluaran yang diumpan balik[7]. Kontroler ini terdiri dari 3 parameter yaitu *proportional*, *integral* dan *derivative*. Kontrol *proportional* melakukan perkalian dengan kesalahan. Kontrol *integral* melakukan penjumlahan kesalahan tiap waktu. Kontrol *derivative* melakukan aksi kontrol berdasarkan kecepatan perubahan sinyal kesalahan. Ketiga kontroler ini selanjutnya ditambahkan untuk menghasilkan sinyal kontrol  $u(t)$  seperti pada Gambar 2.7.

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.22)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.23)$$



**Gambar 2. 7** Diagram Blok Kontroler PID

Pada sistem kontrol modern sering digunakan kontroler PID digital karena reabilitas dari suatu sistem akan meningkat. Sehingga

persamaan kontroler PID dalam bentuk kontinyu, sebagaimana yang ditunjukkan pada persamaan (2.23), tidak dapat langsung digunakan, tetapi harus didiskritkan. Persamaan kontroler PID dalam bentuk diskrit dapat dirumuskan dalam bentuk :

$$u(k) = K_p \left[ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \right]$$

$$= K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D (e(k) - e(k-1)) \quad (2.24)$$

$K_I$  adalah koefisien *integral*,  $K_D$  adalah koefisien *derivative*, dan  $T$  adalah periode sampling.

#### 2.4.1.1. Kontroler P

Kontroler *proportional* merupakan kontroler yang aksi kontrolnya proporsional atau sebanding terhadap sinyal kesalahan. Kontroler *proportional* berupa konstanta dan secara sederhana keluaran kontroler *proportional* merupakan perkalian antara konstanta *proportional* dengan masukannya. Persamaan dari kontrol *proportional* dapat dilihat sebagai berikut:

$$u(t) = K_p [e(t)] \quad (2.25)$$

Karakteristik dari kontroler *proportional* adalah dapat mempercepat respons sistem untuk mencapai keadaan *steady state*. Semakin besar nilai kontrol *proportional* akan memperkecil kesalahan keadaan *steady state*, namun akan membawa sistem ke daerah tidak stabil, karena itu kontroler proporsional tidak dapat menghilangkan nilai *error* ( $e \neq 0$ ), sehingga diperlukan kontroler *integral* agar nilai *error* dapat mendekati nol.

#### 2.4.1.2. Kontroler I

Karakteristik kontroler *integral* adalah menghasilkan respons sistem yang memiliki nilai *error steady state* = 0 (*error* mendekati nol), namun kontroler ini cenderung memperlambat respons. Keluaran kontroler *integral* merupakan penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya

perubahan masukan. Persamaan dari kontrol *integral* dapat dilihat sebagai berikut:

$$u(t) = \left[ \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(t) \right] \quad (2.26)$$

### 2.4.1.3. Kontroler D

Karakteristik keluaran kontroler diferensial memiliki sifat seperti operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada masukan kontroler, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat pada keluaran. Persamaan dari kontrol diferensial dapat dilihat sebagai berikut:

$$u(t) = K_p T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.27)$$

Kelebihan kontroler derivatif apabila ditambah dengan kontroler proporsional dapat mengurangi aksi kontrol yang berlebihan sehingga tidak mengalami *overshoot*.

## 2.5.2. Kontrol Logika Fuzzy

Konsep logika *Fuzzy* pertama kali dikenalkan pada tahun 1965 oleh L.A. Zadeh dari universitas California Barkeley dalam makalah seminarnya yang berjudul “*Fuzzy Set*”. Pada konsep logika *Fuzzy* harga kebenaran diberikan dalam variabel bahasa (linguistik) dengan menyertakan sifat kekaburan (*fuzziness*) pada proposisinya. Harga kebenaran dan derajat kekaburan pada variabel linguistik dapat dinyatakan dengan tolok ukur, misalnya agak, cukup, sangat, dan sebagainya. Sehingga dalam logika *Fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1. Ini yang membedakan antara logika *Fuzzy* dan logika Boolean yang nilai keanggotaannya hanya 0 dan 1 [12].

### 2.5.2.1. Himpunan Fuzzy

Suatu himpunan *Fuzzy*  $F$  dalam semesta  $X$  didefinisikan sebagai kumpulan pasangan elemen  $x$  dan fungsi keanggotaan  $\mu_F(x)$ . Fungsi keanggotaan  $\mu_F(x)$  mempunyai nilai interval  $[0, 1]$  pada tiap  $x$  dalam semesta  $X$ . Nilai fungsi keanggotaan menunjukkan tingkat keanggotaan elemen  $x$  dalam  $F$ . Tingkat keanggotaan 1 menunjukkan keanggotaan penuh (*full membership*), tingkat 0 menyatakan tanpa

keanggotaan (*non membership*), tingkat antara 0 dan 1 menyatakan kekaburan antara keanggotaan penuh dan tanpa keanggotaan.

Tingkat keanggotaan inilah yang biasanya disebut tingkat logika *Fuzzy*. Himpunan *Fuzzy* pada  $F$  pada semesta pembicaraan  $X$  yang anggotanya berhingga,  $X = \{ x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \}$  dapat dinyatakan dalam bentuk himpunan *Fuzzy*. Secara umum himpunan *Fuzzy* dinotasikan sebagai :

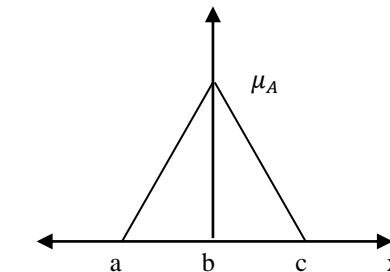
$$F = \{ (x, \mu_F(x)) \mid x \in X \} \quad (2.28)$$

### 2.5.2.2. Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi keanggotaan adalah suatu fungsi untuk menyatakan hubungan antara sebuah masukan dengan sebuah himpunan *Fuzzy*. Untuk menyatakan suatu fungsi keanggotaan dalam pendefinisian himpunan *Fuzzy* tergantung pada metode yang akan digunakan. Secara umum ada dua metode yaitu pendefinisian secara numerik dan bentuk fungsi. Pendefinisian secara numerik diterapkan atas himpunan dengan pendukung diskrit, sedangkan pendefinisian bentuk fungsi diterapkan pada pendukung kontinu.

- a. Fungsi keanggotaan Segitiga (*Triangular*)

Fungsi keanggotaan segitiga (*tringular*) sesuai dengan namanya berbentuk segitiga dengan parameter  $a$ ,  $b$  dan  $c$  pada Persamaan 2.29. Fungsi keanggoaan segitiga ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



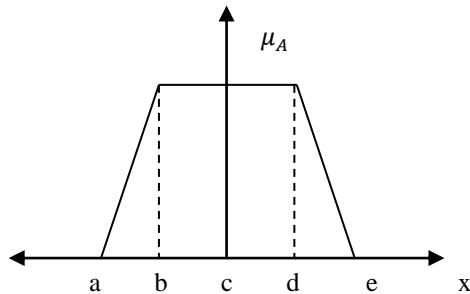
**Gambar 2. 8** Fungsi Keanggotaan Segitiga



$$\mu_A = \begin{cases} 0, & x \leq a; x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (2.29)$$

- b. Fungsi Keanggotaan Trapesium  
Fungsi ini menggunakan parameter a dan b, dengan Persamaan 2.30, serta bentuk fungsi keanggotaan terlihat pada Gambar 2.9.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; x \geq e \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x < d \\ \frac{d-x}{d-c}, & d < x < e \end{cases} \quad (2.30)$$



**Gambar 2. 9** Fungsi Keanggotaan Trapesium

### 2.5.2.3. Operasi Himpunan *Fuzzy*

Operasi dasar yang berlaku pada himpunan *Fuzzy* A dan B dari semesta X dengan tingkat keanggotaan  $\mu_A(x)$  dan  $\mu_B(x)$  untuk  $x \in X$  adalah sebagai berikut :

- a. Dua himpunan *Fuzzy* A dan B dikatakan sama ( $A = B$ ) apabila keduanya memiliki semesta yang sama dan fungsi

keanggotaan yang sama. Hal ini dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.31.

$$\frac{\mu(x_A)}{x} = \frac{\mu(x_B)}{x}; x \in X \quad (2.31)$$

- b. Gabungan dua himpunan *Fuzzy* A dan B ( $A \cup B$ ) dinyatakan dengan Persamaan 2.32.

$$\mu_A \cup B = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)); x \in X \quad (2.32)$$

- c. Irisan dari himpunan *Fuzzy* A dan B ( $A \cap B$ ) dinyatakan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.33.

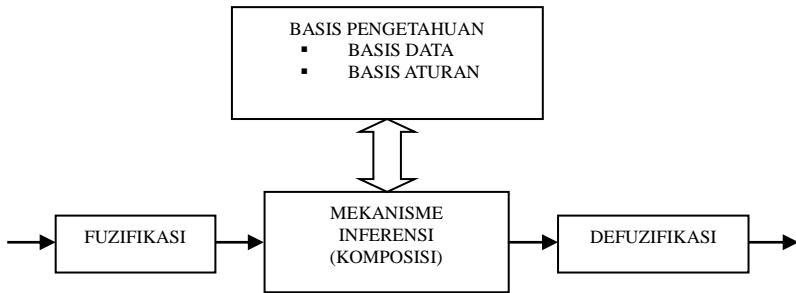
$$\mu_A \cap B = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)); x \in X \quad (2.33)$$

- d. Komplemen (operasi “NOT”) himpunan *Fuzzy* A dinotasikan dengan  $\bar{A}$  dapat dinyatakan pada Persamaan 2.34.

$$\mu_A'(x) = 1 - \mu_A(x); x \in X \quad (2.34)$$

#### 2.5.2.4. Sistem Kontrol *Fuzzy*

Sistem kontrol *Fuzzy* merupakan pemetaan dari masukan menjadi keluaran *Fuzzy*. Secara umum sistem kontrol *Fuzzy* terdiri dari empat bagian dasar yaitu fuzifikasi, aturan basis (*Rule Base*), inferensi *Fuzzy*, dan defuzifikasi. Proses pada sistem kontrol *Fuzzy* dimulai dari nilai masukan *Fuzzy* diubah menjadi himpunan *Fuzzy* melalui proses fuzifikasi. Selanjutnya himpunan *Fuzzy* masuk ke mekanisme inferensi *Fuzzy* untuk menentukan kesimpulan *Fuzzy* dengan mengacu pada *rule base*. Proses akhir masuk ke proses defuzifikasi untuk diubah menjadi keluaran *Fuzzy*. Sistem kontrol *Fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2. 10** Sistem Kontrol Fuzzy

a. Fuzifikasi

Fuzifikasi merupakan proses yang mengubah variabel nyata menjadi variabel *Fuzzy*. Hal ini bertujuan agar masukan kontroler *Fuzzy* bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan *Fuzzy*. Pemetaan dilakukan dengan bantuan model dari fungsi keanggotaan agar dapat diketahui besar masukan tersebut.

b. Aturan Basis (*Rule Base*)

Kaidah dasar yang berisi aturan-aturan secara linguistik yang menunjukkan kepakaran terhadap *plant* atau suatu aturan yang menghubungkan antara masukan *Fuzzy* dan aksi kontrol dari kontroler *Fuzzy*. Format yang paling umum adalah aturan *IF-THEN*, sebagai berikut:

***IF premise THEN conclusion***

c. Inferensi *Fuzzy*

Inferensi *Fuzzy* adalah sebuah proses formulasi pemetaan masukan terhadap keluaran dengan menggunakan logika *Fuzzy*. Proses dari inferensi *Fuzzy* melibatkan fungsi keanggotaan operator logika *Fuzzy*, dan aturan *IF-THEN*. Terdapat dua metode inferensi yang paling dikenal yaitu metode inferensi Mamdani dan metode inferensi Takagi-Sugeno. Pada metode Mamdani, menggunakan operasi *Max-Min* atau *Max-product* dalam memperoleh keluaran, sedangkan pada metode Takagi-Sugeno menggunakan fungsi keanggotaan keluaran yang bersifat linear atau konstan.

- Metode Mamdani

$$\mu_u(k) = \max [\mu_u(k), \min \{\mu_e(j), \mu_{de}(i)\}] \quad (2.35)$$

- d. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses yang digunakan untuk mengubah kembali variabel *Fuzzy* menjadi variabel nyata, atau dengan kata lain aksi kontrol *Fuzzy* yang masih berupa himpunan, diubah menjadi nilai nyata yang berupa nilai tunggal. Metode yang dapat digunakan untuk defuzzifikasi yaitu *Center of Average* (COA) dengan Persamaan 2.36.

$$U_0 = \frac{\sum_{k=1}^m u_k(T) \cdot \mu_u(u_k(T))}{\sum_{k=1}^m \mu_k(u_k(T))} \quad (2.36)$$

## 2.6. Penelitian Sebelumnya

Penerapan kombinasi kontrol *Fuzzy – PID* sudah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti [12][5][6]. Kontrol ini diterapkan diberbagai bidang, seperti : Industri kendaraan listrik dan dunia robotika. Hasil dari penelitian sebelumnya didapatkan bahwa kontrol *Fuzzy-PID* memiliki efek kontrol yang lebih baik daripada kontrol PID konvensional, meningkatkan kecepatan respons sistem, menekan *overshoot*, dan dapat memberikan perfoma yang lebih baik ketika ada perubahan pembebanan.

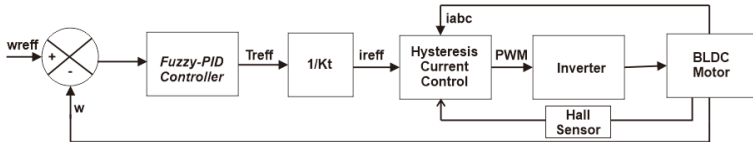
Sepeda motor GESITS sendiri pada saat ini menggunakan kontroler *Fuzzy* dengan fungsi keluaran berupa nilai *dutycycle* yang berubah sesuai dengan *error* dan *delta error* masukan kecepatan yang diterima [13]. Kelemahan kontrol ini yaitu tidak bisa membatasi arus pada saat *starting* akibatnya diperlukan Mosfet yang memiliki kapasitas arus yang lebih besar dari 150A agar kontroler tidak rusak, oleh karena itu perlu diberikan tambahan teknik kontrol arus untuk menekan lonjakan arusnya.

## BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas tentang pemodelan keseluruhan sistem, perancangan simulasi motor BLDC, perancangan *hysteresis current control*, serta perancangan *Fuzzy-PID Controller* untuk mengatur kecepatan motor BLDC.

### 3.1. Blok Diagram Keseluruhan Sistem

Blok Diagram keseluruhan sistem dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1. Blok ini dirancang dan disimulasikan di aplikasi Simulink Matlab.



**Gambar 3. 1** Blok Simulasi Sistem

Penjelasan dari gambar diatas adalah *Fuzzy – PID Controller* menerima *error* kecepatan dari kecepatan referensi dan kecepatan aktual. Selanjutnya keluaran dari kontroler menjadi torsi referensi yang telah dibatasi sebesar 11.1 N.m sesuai dengan rating motor BLDC. Blok selanjutnya digunakan untuk mengubah nilai torsi referensi menjadi nilai arus referensi menggunakan konstanta torsi ( $K_t$ ). Didalam blok *Hysteresis Current Control*, arus referensi dan arus aktual akan diolah agar menjadi PWM untuk mengaktifkan urutan *switching* pada inverter.

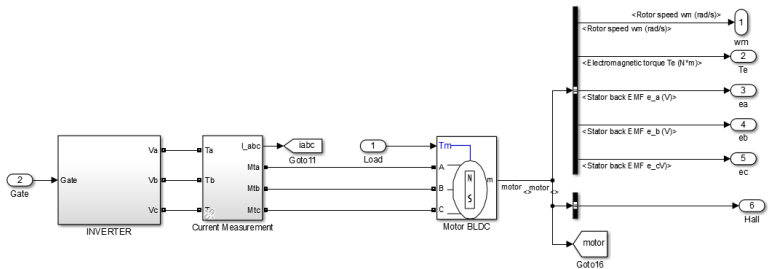
Tujuan perancangan pada gambar 3.1 yaitu untuk mempermudah pembaca dalam melihat sistem secara keseluruhan. Didalam blok –blok tersebut masih ada subsistem lagi yang nantinya akan dibahas pada subbab selanjutnya. Untuk detail blok simulasi sistem yang lengkap dapat dilihat dibagian lampiran pada buku ini.

### 3.2. Perancangan Simulasi Motor BLDC

Pada bagian ini, blok sistem yang dijelaskan secara umum di subbab 3.1 akan dijelaskan lebih rinci sesuai dengan dasar teori yang ada pada bab 2.

### 3.2.1. Blok Motor BLDC

Blok motor terdiri dari 3 subsistem, yaitu blok inverter, blok pengukuran arus dan blok motor BLDC. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.2.



**Gambar 3. 2** Blok Motor BLDC

### 3.2.2. Parameter Motor BLDC

Parameter motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1 dan 3.2 :

**Tabel 3. 1** Parameter Motor BLDC GESITS

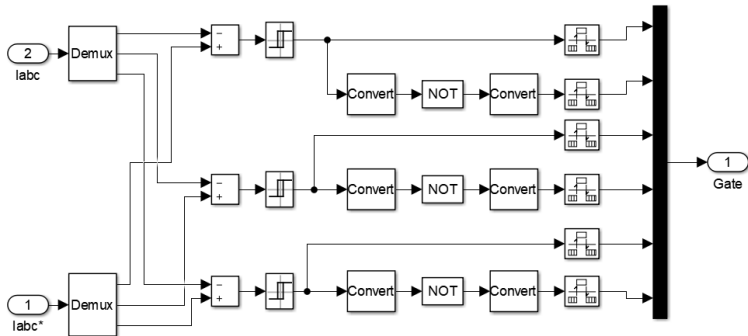
Parameter	Nilai	Satuan
R	0,04335	$\Omega$
L	105,2665	$\mu\text{H}$
$k_e$	18,935	volt/krpm
$k_t$	0,180815	N.m/A
B	0,016158	N.m.s
J	0,059009	$\text{Kg.m}^2$
Jumlah pasang kutub	4	-

**Tabel 3. 2** Parameter Rating Motor BLDC

Parameter	Nilai	Satuan
V	100	Volt
I	61,4	A
Daya	5	kW
Torsi	11,1	N.m
Kecepatan	5000	rpm

### 3.3. Perancangan *Hysteresis Current Control (HCC)*

Bagian ini berisi perbandingan arus referensi  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$ , dan arus aktual  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , dimana arus aktual diharapkan dapat mengikuti arus referensi. Dalam blok ini juga terdapat hysteresis band dengan lebar transisi yang nilainya dapat diubah-ubah. Gambar 3.3 memperlihatkan blok rangkaian HCC dengan masukan arus referensi dan arus aktual, sedangkan outputnya berupa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Lebar transisi ditentukan sebesar 0.01, maka batas bawah dan batas atas *hysteresis band* adalah -0,005 dan +0,005. Batas inilah yang akan menentukan *switching* nilai tegangan yang akan diinputkan ke inverter. Prinsip kerja HCC, secara lengkap dijelaskan pada subbab 2.3.

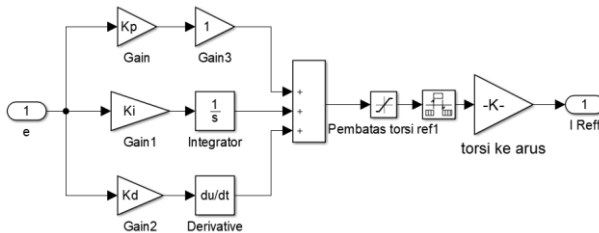


Gambar 3. 3 Blok *Hysteresis Current Control*

### 3.4. Perancangan Kontrol Kecepatan

#### 3.4.1. Perancangan Kontrol PID

Dalam penelitian ini, untuk mengetahui performa respons dari *Fuzzy-PID Controller*, penulis membandingkannya dengan *PID Controller*. Berikut blok diagramnya.



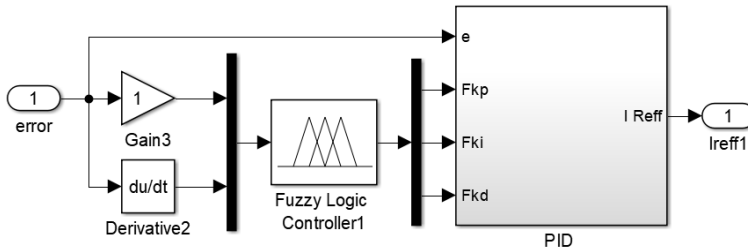
Gambar 3. 4 Kontroler PID

Untuk mendapatkan Parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ , penulis menggunakan metode *trial and error* dan disesuaikan dengan karakteristik sistem secara *open loop*. Selanjutnya nilai parameter tersebut akan menjadi acuan fungsi keanggotaan *Fuzzy*. Nilai parameter yang didapatkan berturut-turut adalah, 10, 0.02, dan 0.0001.

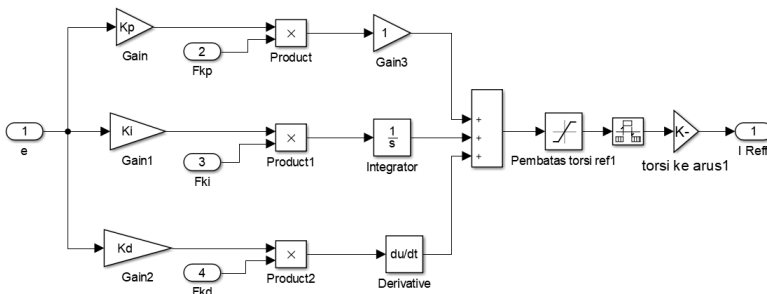
### 3.4.2. Perancangan *Fuzzy-PID Controller*

Kontroler PID belum mampu menangani masalah –masalah pada sistem yang berubah-ubah (tidak linear), sehingga dalam penelitian ini penulis menggunakan perpaduan *Fuzzy Logic* dan *PID Controller*. Fungsi dari *Fuzzy* yaitu untuk merubah parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  agar dapat mengikuti perubahan sistem yang tidak pasti atau tidak linear.

*Fuzzy – PID Controller* yang didesain pada penelitian ini terdiri dari 3 (tiga) sub-kontroler *Fuzzy*, yaitu *Fuzzy-P*, *Fuzzy-I*, dan *Fuzzy-D*. Input dari *Fuzzy-PID* berupa nilai *error* dan  $\Delta error$ , sedangkan output dari masing-masing *Fuzzy-PID* berupa nilai parameter  $fK_p$ ,  $fK_i$ , dan  $fK_d$  yang berubah secara langsung. Adapun struktur dari *Fuzzy-PID Controller* pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6.



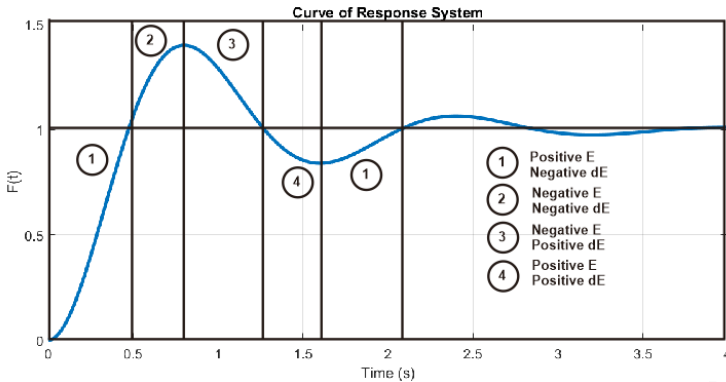
**Gambar 3. 5** Struktur Kontroler *Fuzzy – PID*



**Gambar 3. 6** Subsistem Blok PID



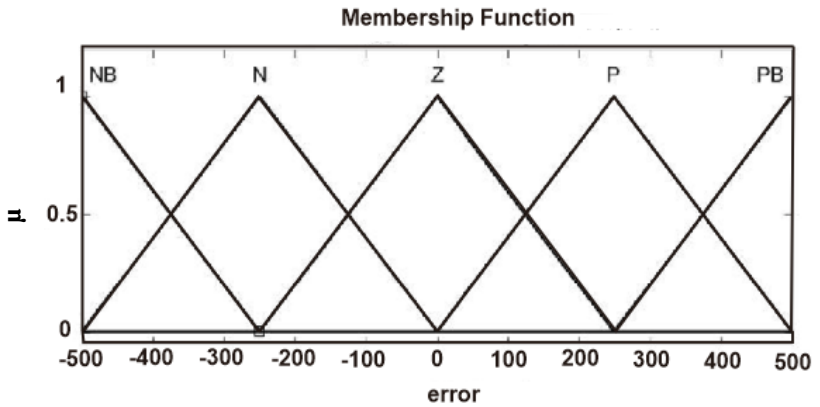
Pada gambar diatas, *output* dari *Fuzzy* yang berupa  $F_{K_p}$ ,  $F_{K_i}$ , dan  $F_{K_d}$  masing-masing akan dikalikan dengan kontroler PID sebelumnya, Kontroler PID ini berfungsi untuk mengontrol kecepatan motor selama *error* diatas 500 RPM. Cara kerjanya dengan mengalikan masing-masing nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dengan keluaran *Fuzzy* yang nilai  $F_{K_p}$ ,  $F_{K_i}$ , dan  $F_{K_d}$ -nya selalu berada pada posisi PM (*Positive Medium*). Jika *error* sudah memasuki 500 RPM kebawah, parameter akhir dari kontroler ini akan menyesuaikan dengan fungsi keanggotaan *Fuzzy*.



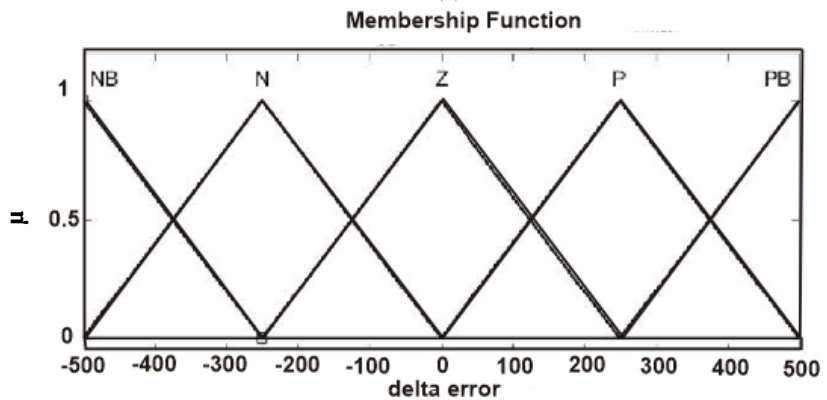
**Gambar 3. 7** Respons Sistem

Respons sistem pada gambar 3.7 menjadi acuan dalam perancangan *fuzzy –PID Controller*. Dimana input yang penulis gunakan berupa nilai *error* kecepatan dan perubahan dari *error* kecepatan (*delta error*).

Setiap input dan output dari *Fuzzy-PID* terdiri dari 5 (lima) *Fuzzy set*, dengan fungsi keanggotaan berupa fungsi segitiga. *Fuzzy set* untuk *input* adalah NB(*Negative Big*), N(*Negative*), Z (*Zero*), P (*Positive*), dan PB (*Positive Big*), sedangkan untuk *output*, Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), P (*Positive*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Kelima *Fuzzy set* tersebut dapat dinotasikan sebagai  $F_j^i$ ,  $i=1,2$  dan  $j=1,2,...,5$ . Sedangkan nilai dari fungsi keanggotaan setiap *input* dinotasikan sebagai  $\mu F_j^i(e, \Delta e)$ ,  $j=1,2,...,5$ .  $F_{K_p}$ ,  $F_{K_i}$  dan  $F_{K_d}$  adalah output dari masing-masing sub-kontroler. Adapun fungsi keanggotaan dari input kontroler *Fuzzy-PID* ditunjukkan oleh gambar 3.8.



(a)



(b)

**Gambar 3. 8** Fungsi Keanggotaan dari *input Fuzzy – PID* (a) *error*, (b) *delta error*

Selanjutnya adalah menentukan aturan inferensi *Fuzzy*, IF-THEN *rule*. Jumlah dari aturan *Fuzzy* merupakan perkalian dari jumlah *Fuzzy set* untuk setiap *input*, sehingga dengan 5 (lima) *Fuzzy set* untuk masing-masing *input*, maka akan terdapat 25 aturan inferensi *Fuzzy*. Secara umum aturan *Fuzzy* dapat dituliskan sebagai.

$$R^k: IF e \text{ is } F_1^j, AND \Delta e \text{ is } F_2^j THEN f \text{ is } C_k^l \quad (3.1)$$

for  $j = 1, \dots, 5$ ;  $l = 1, \dots, 3$ ;  $k = 1, \dots, 25$

Pada penelitian ini, kedua puluh lima aturan inferensi *Fuzzy* untuk *Fuzzy – P*, *Fuzzy – I*, dan *Fuzzy-D* berturut-turut ditunjukkan pada tabel 3.3, 3.4, dan 3.5. Setiap aturan *Fuzzy* ini dihubungkan dengan operator *min* untuk mendapatkan bobot kuatnya suatu aturan (*rule strength*). Hal ini dapat dituliskan sebagai :

$$\xi_{i,j} = \min(\mu F_i^e, \mu F_j^{\Delta e}) \quad (3.2)$$

i merupakan indeks yang berhubungan dengan variabel *Fuzzy* untuk nilai *error*, sedangkan j adalah indeks yang berhubungan dengan variabel *Fuzzy* untuk nilai  $\Delta error$ .

**Tabel 3. 3** Aturan inferensi *Fuzzy* untuk - P

e \ $\Delta e$	NB	N	Z	P	PB
NB	Z	Z	PS	P	PM
N	Z	PS	P	PM	PM
Z	PS	P	PM	PM	PB
P	P	PM	PM	PB	PB
PB	PM	PM	PB	PB	PB

**Tabel 3. 4** Aturan inferensi *Fuzzy* untuk – I

e \ $\Delta e$	NB	N	Z	P	PB
NB	Z	Z	PS	P	PM
N	Z	PS	P	PM	PB
Z	PB	PB	PM	PB	PB
P	PB	PM	P	PS	Z
PB	PM	P	PS	Z	Z

**Tabel 3. 5** Aturan inferensi *Fuzzy* untuk - D

$e \setminus \Delta e$	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM
N	PB	PB	PM	PM	P
Z	PB	PM	PM	P	PS
P	PM	PM	P	PS	Z
PB	PM	P	PS	Z	Z

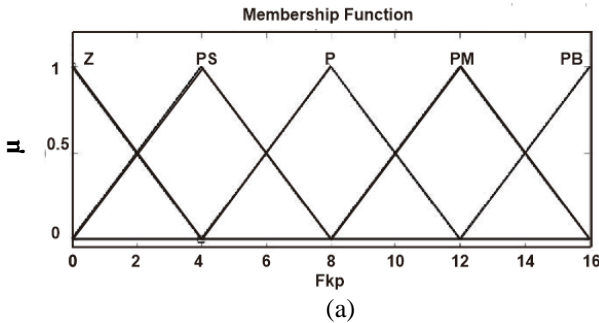
Selanjutnya adalah proses defuzzifikasi, yaitu proses untuk mendapatkan nilai *output* secara tegas. Pada proses defuzzifikasi digunakan metode *centroid*. Maka, *output* dari masing-masing sub-kontroler dapat dituliskan sebagai.

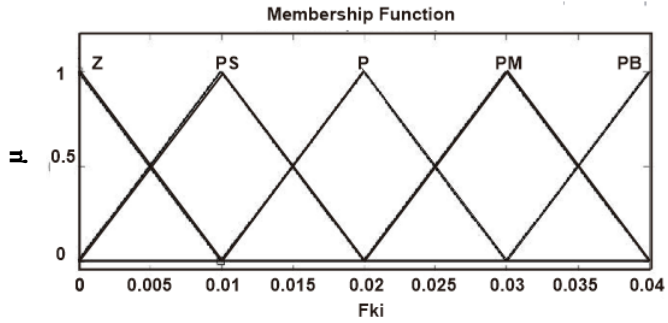
$$f(e, \Delta e) = \frac{\sum_{l=1}^{25} \mu_{O_l}(\min_{i=1,2} \mu_{F_i^l}(e, \Delta e))}{\sum_{l=1}^{25} (\min_{i=1,2} \mu_{F_i^l}(e, \Delta e))} \quad (3.3)$$

Nilai *output* dari masing-masing sub-kontroler akan dikalikan dengan kontroler PID sebelumnya, seperti yang dijelaskan di paragraf ke tiga dalam subbab ini. Sehingga *output* terakhir dari kontroler *Fuzzy-PID* dapat dituliskan menjadi :

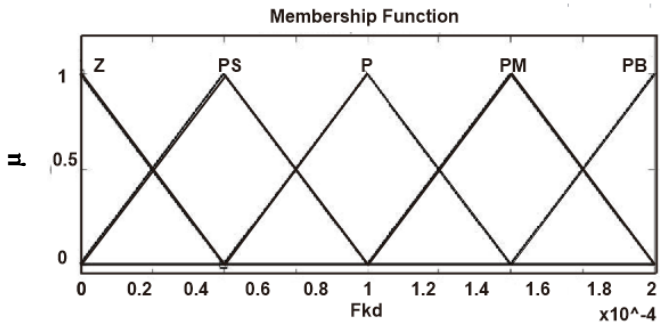
$$u_{PID} = F_{K_p} K_p e(k) + F_{K_i} K_i \sum_{i=1}^k e(k) + F_{K_d} K_d \frac{\Delta e(k)}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Fungsi keanggotaan output *Fuzzy-PID* ditunjukkan oleh gambar 3.9.





(b)



(c)

**Gambar 3. 9** Fungsi Keanggotaan dari *output Fuzzy – PID* (a) *Fuzzy-P* (b) *Fuzzy-I* (c) *Fuzzy-D*

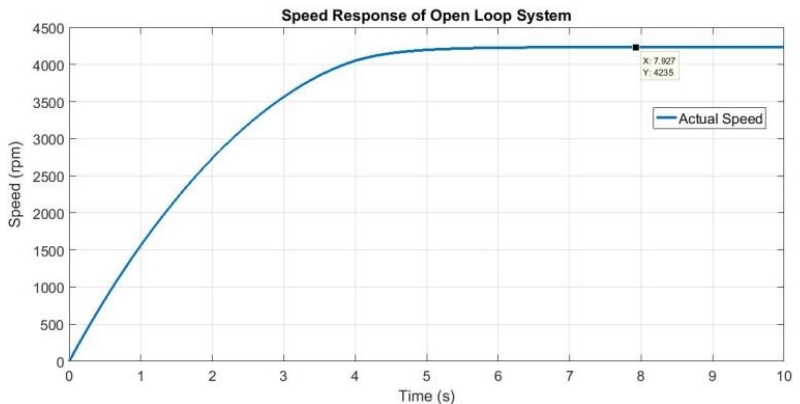
.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini berupa simulasi model. Selanjutnya, hasil dari pengujian simulasi akan dianalisis. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan sistem pengaturan kecepatan pada kendaraan listrik khususnya sepeda motor GESITS.

### 4.1. Simulasi sistem *Open Loop* Motor BLDC

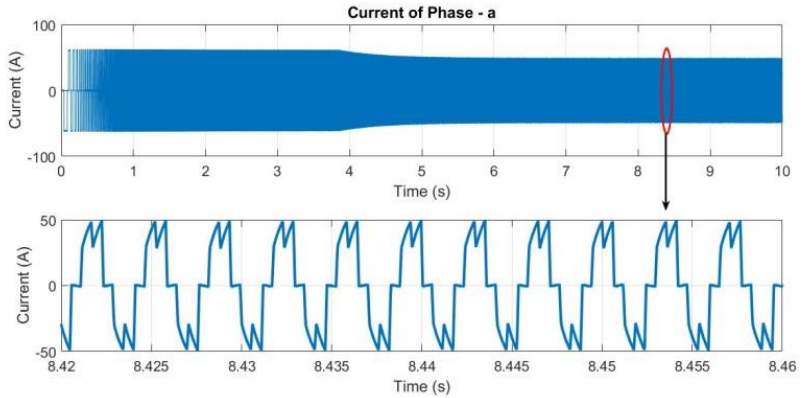
Sebelum melakukan simulasi pengaturan kecepatan motor BLDC, dilakukan uji sistem *open loop*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui performa sistem sebelum diberikan kontrol kecepatan. Simulasi *open loop* dilakukan dengan cara memberikan *input* tegangan sesuai dengan *rating* motor BLDC yaitu sebesar 100 Volt dan memberikan, selanjutnya grafik repon kecepatan, arus dan torsi akan dianalisa.



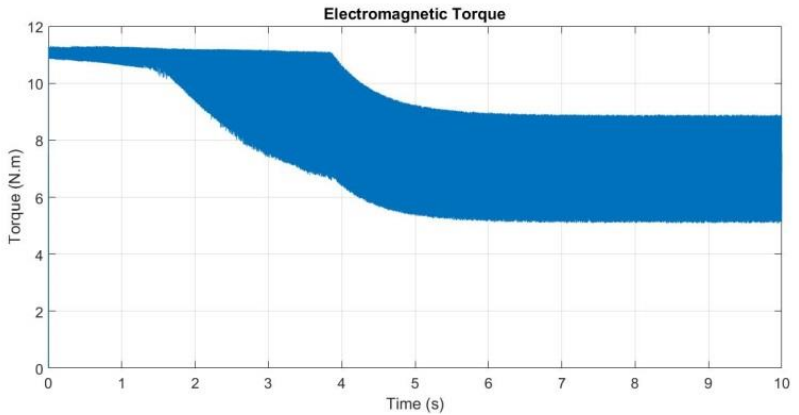
**Gambar 4. 1** Respons kecepatan motor BLDC sistem open loop

Pada gambar 4.1 dan 4.2, *input* torsi referensi yang diberikan sebesar 11.1 N.m atau setara dengan memberikan arus referensi sebesar 61.39 A. Hasil yang didapatkan yaitu arus *start* mencapai 62.86 A. Kecepatan *steady state* motor BLDC mencapai 4235 RPM dengan *rise time* sebesar 3,1752 detik dan *time constant* sebesar 1.942 detik. Selanjutnya dengan adanya sistem *open loop* ini, maka penentuan

perancangan kontroler kecepatan, baik *PID Controller* maupun *Fuzzy – PID Controller* dapat dilakukan .



(a)



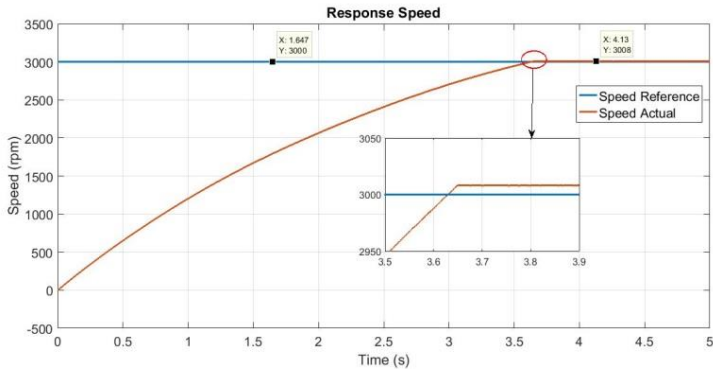
(b)

**Gambar 4. 2** (a) Arus fasa stator-a (b) Torsi Elektromagnetik Motor BLDC

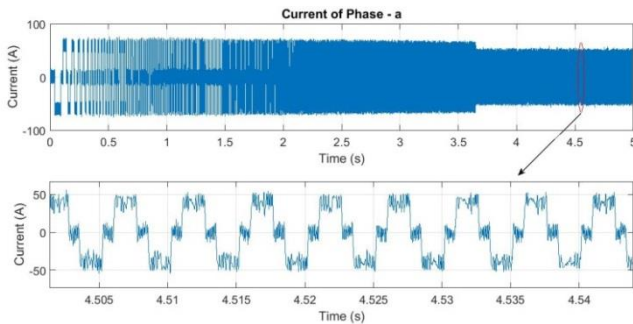


## 4.2. Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC dengan Metode *PID Controller*

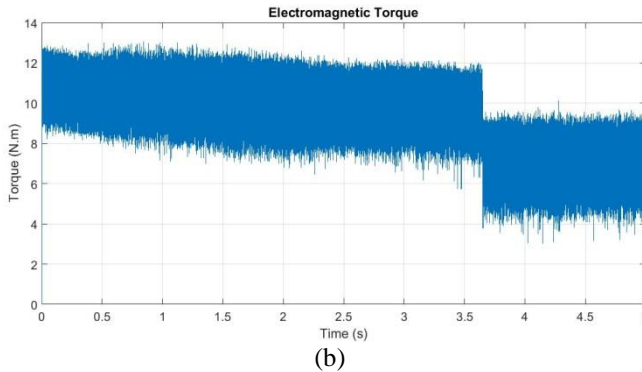
Kontrol kecepatan dengan metode *PID Controller* yang telah didesain, selanjutnya disimulasikan untuk melihat performa dari sistem kontrol. Setelah itu, parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang dihasilkan akan digunakan sebagai acuan fungsi keanggotaan pada *Fuzzy-PID Controller*. Simulasi dilakukan dengan memberikan kecepatan referensi dengan nilai tertentu, yaitu sebesar 3000 RPM dan beban sebesar 2 N.m. Hasil respons kecepatan, arus dan torsi elektromagnetik dari simulasi yang telah dilakukan ditunjukkan oleh gambar 4.3 dan 4.4



**Gambar 4. 3** Respons Kecepatan motor BLDC dengan menggunakan kontrol PID



(a)



**Gambar 4. 4** (a) Arus fasa stator-a (b) Torsi Elektromagnetik Motor BLDC dengan metode PID Controller

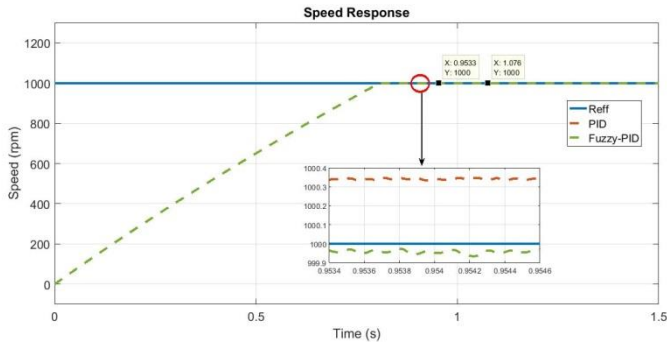
Berdasarkan hasil simulasi, dapat dilihat bahwa kontrol kecepatan PID mampu mengikuti kecepatan referensi yang diberikan. Sistem mencapai kecepatan yang diinginkan dengan *error steady state* sebesar 0,267 % dan *rise time* sebesar 2.7798 detik. Sedangkan pada gambar 4.4 a, dapat dilihat bahwa metode *hysteresis current control* telah bekerja dengan baik.

### 4.3. Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC dengan Metode *Fuzzy-PID*

Setelah mengetahui parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  pada subbab 4.2, hal selanjutnya yang dilakukan yaitu menentukan fungsi keanggotaan *Fuzzy-PID Controller*. Pada bab 3, penulis telah merancang fungsi keanggotaan *Fuzzy*, maka pada bagian ini akan membandingkan respons kecepatan untuk masing-masing jenis kontroler. Yaitu dengan membandingkan *PID Controller* dan *Fuzzy-PID Controller*.

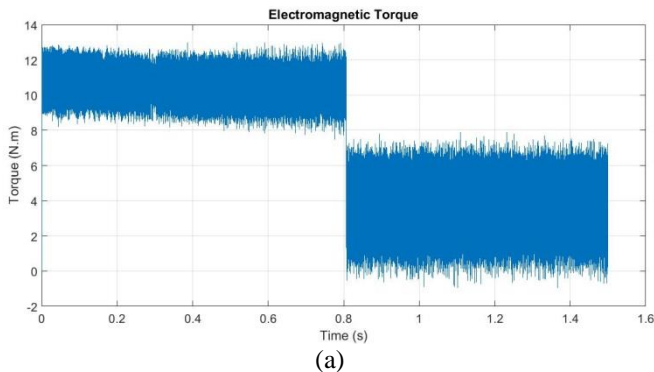
#### 4.3.1. Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Berbeban

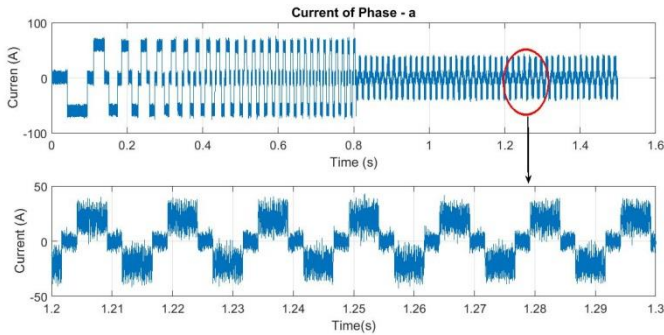
Pada bagian ini, beban yang digunakan sebesar 2 N.m, setelah itu akan diamati arus dan karakteristik torsi pada motor BLDC yang akan diuji. Kecepatan diatur sebesar 1000 RPM. Hasil simulasinya ditunjukkan oleh gambar 4.5.



**Gambar 4. 5** Respons kecepatan dengan referensi tetap dan dengan beban 0.1 N.m

*Error* kecepatan pada saat *steady state* untuk kontroler *Fuzzy – PID* sebesar 0.005 %, sedangkan 0.035 % untuk kontrol *PID*, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kontrol kecepatan menggunakan *Fuzzy – PID* mempunyai respons yang lebih baik dari pada *PID Controller*. Kondisi *steady state* dicapai pada saat 0.8092 detik dengan *rise time* sebesar 0.645 detik untuk *Fuzzy – PID* dan 0.64536 untuk *PID Controller*. Metode *hysteresis current control* yang diterapkan juga telah bekerja dengan baik yaitu dengan cara memberikan batasan arus di setiap stator. Gambar 4.6 a,b menunjukkan grafik torsi dan arus motor BLDC menggunakan metode *Fuzzy – PID Controller*.



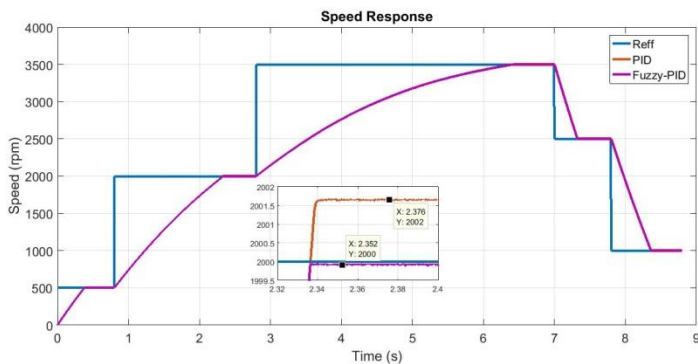


(b)

**Gambar 4. 6** (a)Torsi dan (b) arus saat kecepatan tetap dengan beban 2 N.m

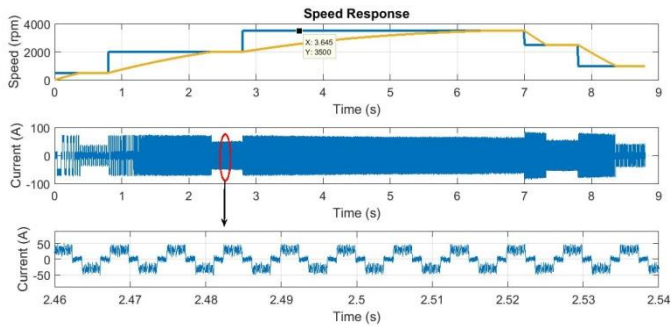
#### 4.3.2. Simulasi dengan Kecepatan Referensi Berubah dan Berbeban

Simulasi dengan kecepatan referensi berubah, dilakukan untuk mengetahui respons sistem kontrol yang telah didesain agar dapat mengikuti nilai referensi yang diberikan. Kecepatan referensi diatur dari nilai 500 hingga 3500 RPM. Gambar 4.7 menunjukkan hasil respons kecepatan dengan kecepatan referensi berubah.

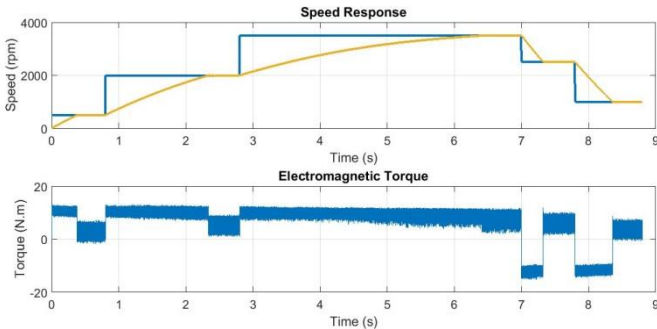


**Gambar 4. 7** Respons kecepatan dengan kecepatan referensi berubah

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, untuk proses *tracking* kecepatan, kontroler *Fuzzy-PID* mampu mengikuti pola kecepatan referensi sesuai dengan yang diberikan dan memiliki *error steady state* sebesar 0.005%, sedangkan untuk *PID Controller* sebesar 0.08 % pada saat kecepatan 2000 RPM. *Error steady state* dari kontroler *Fuzzy-PID* memiliki nilai yang lebih kecil dari pada Kontroler PID.



(a)



(b)

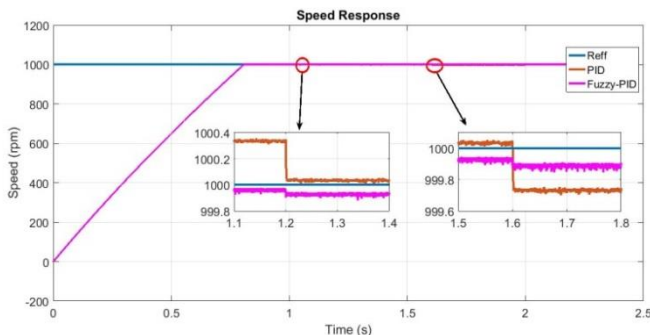
**Gambar 4. 8** (a) arus dan (b) torsi saat kecepatan bervariasi

Kondisi arus dan torsi elektromagnetik saat terjadi perubahan kecepatan referensi, ditunjukkan oleh gambar 4.8 a,b. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, saat ada perubahan kecepatan, terjadi lonjakan arus pada stator, baik pada saat kenaikan kecepatan maupun penurunan kecepatan, namun lonjakan dari arus ini masih dalam batasan yang

diizinkan sesuai dengan rating motor BLDC. Lonjakan arus ini disebabkan karena pada saat terjadinya percepatan, diperlukan torsi yang lebih besar, sehingga sumber tegangan  $V_{dc}$  memperbesar suplai arus pada stator. Ketika terjadi perlambatan, terjadi pengereman secara regeneratif, dimana arus yang tersimpan pada belitan stator, dialirkan kembali kesistem, hal ini ditandai dengan adanya torsi yang bernilai negatif sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 b.

#### 4.3.3. Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Berubah

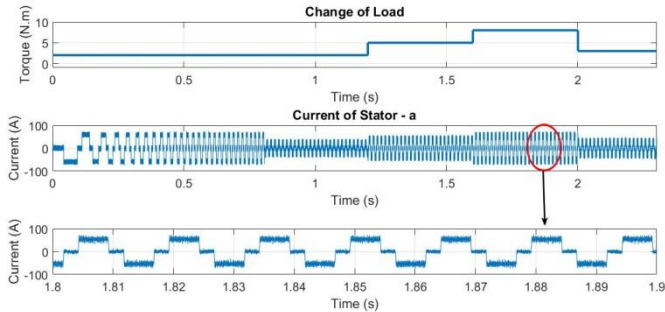
Simulasi dengan kecepatan referensi tetap dengan perubahan beban pada waktu tertentu, merepresentasikan perubahan beban yang dinamis pada kendaraan listrik. Perubahan beban yang terjadi pada simulasi ini ditunjukkan oleh gambar 4.9. Selanjutnya sistem kontrol diuji apakah mampu mengembalikan kondisi sistem sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan.



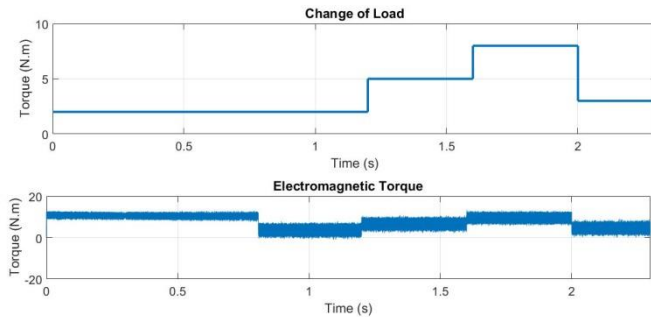
**Gambar 4. 9** Respons Kecepatan terhadap perubahan beban

Gambar 4.9 menunjukkan respons kecepatan saat terjadi perubahan beban. Pada saat detik ke-1.2, sistem diberi beban sebesar 5 N.m, dan pada detik ke-1.6 beban dinaikkan menjadi 8 N.m. dari kedua kasus tersebut terlihat bahwa pada saat beban dinaikkan, respons kecepatan mulai turun, namun penurunan kecepatan masih dalam toleransi nilai *error*, dengan nilai *error* kurang dari 1 %. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa kontrol kecepatan yang dirancang sudah baik, namun *Fuzzy-PID Controller* jauh lebih baik dari pada respons *PID Controller*. Penurunan kecepatan pada saat terjadi perubahan beban, tidak merubah nilai kecepatan secara signifikan, hal ini terjadi karena

sistem kontrol yang dirancang, selain mempertimbangkan nilai kecepatan, juga mempertimbangkan nilai torsi yang diperlukan oleh sistem. Adapun arus dan torsi elektromagnetik saat beban berubah dengan menggunakan *Fuzzy-PID Controller*, ditunjukkan oleh gambar 4.10.



(a)



(b)

**Gambar 4. 10** (a) Perubahan beban dan arus stator fasa-a dan (b) torsi saat beban bervariasi

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh gambar 4.10 (a,b). Ketika terjadi perubahan beban, sistem dapat langsung merespons kebutuhan torsi dengan baik. Hal ini dapat dilihat dengan adanya perubahan torsi elektromagnetik dan arus stator pada saat terjadi perubahan pembebanan.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan dalam penelitian ini didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Kontroler *Fuzzy –PID* yang dirancang, dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor BLDC dengan *error steady state* sebesar 0.005% dan *response time* 0.645 detik pada kecepatan 1000 RPM dengan beban 2 N.m, sedangkan untuk kontroler PID, memiliki *error steady state* sebesar 0.035% dan *response time* sebesar 0.64536 detik.
- b. Pada saat motor BLDC diberikan referensi kecepatan yang bervariasi, kontroler mampu mengikuti referensi yang diberikan. Kontroler *Fuzzy –PID* mampu bekerja lebih baik daripada kontroler PID, dibuktikan dengan nilai *error* kecepatan pada saat 2000 RPM sebesar 0.005%, sedangkan untuk kontroler PID sebesar 0.08%.
- c. Saat motor diberikan beban bervariasi dengan kecepatan tetap sebesar 1000 RPM, dapat dilihat bahwa, kontroler *Fuzzy –PID* mampu memberikan respons kecepatan yang lebih baik, karena penurunan kecepatannya tidak terlalu signifikan, sedangkan pada kontroler PID, penurunan kecepatannya lebih besar meskipun masih dalam toleransi nilai *error* yang diinginkan.
- d. Kontroler *Fuzzy-PID* menghasilkan respons kecepatan yang lebih baik daripada kontroler PID konvensional, hal ini terjadi karena ada perubahan nilai pada parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang disesuaikan dengan masukan nilai *error* dan *delta error* kecepatan. Parameter ini didapatkan setelah diolah didalam fungsi *Fuzzy*.
- e. Kontrol arus *hysteresis* mampu mengatasi lonjakan arus saat motor BLDC *starting*, sehingga jika penelitian ini diimplementasikan, biaya produksi kontroler akan berkurang karena peneliti tidak perlu lagi menggunakan komponen Mosfet yang kapasitas arusnya tinggi dan mahal.

## **5.2. Saran**

Sebagai sarana pengembangan kontroler motor BLDC ini, maka terdapat beberapa saran dari penulis berdasarkan hasil yang diperoleh saat simulasi, yaitu :

- a. Untuk mengetahui pengaruh dari kontroler terhadap motor, perlu dilakukan implementasi sistem kontrol.
- b. Dalam penelitian ini, perlu dilakukan pengembangan sistem kontrol dengan metode lainnya, seperti Jaringan saraf tiruan maupun kecerdasan buatan.

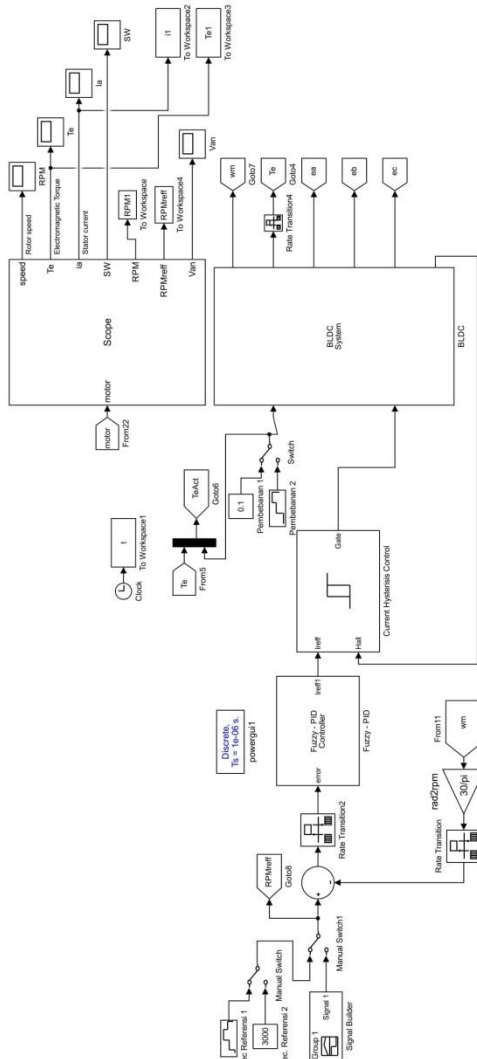
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hong-xing Wu, Shu-kang Cheng, and Shu-mei Cui, "A controller of brushless DC motor for electric vehicle," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 1, pp. 509–513, Jan. 2005.
- [2] B. K. Bose, "Energy, environment, and advances in power electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 688–701, Jul. 2000.
- [3] M. Singh and A. Garg, "Performance evaluation of BLDC motor with conventional PI and fuzzy speed controller," in *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2012, pp. 1–6.
- [4] S. Zhang and Y. Wang, "The simulation of BLDC motor speed control based-optimized fuzzy PID algorithm," in *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, pp. 287–292.
- [5] Y. Sheng, X. Wang, L. Wang, and P. Hou, "Fuzzy-PID control system design of brushless DC motor based on vector control," in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017, pp. 5583–5587.
- [6] D. Luo, W. Huang, S. Huang, W. Li, and L. Zheng, "Simulation study of the fuzzy-PID control system for brushless DC motors," in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1–4.
- [7] Y. Zhao and Y. Pan, "The Design and Simulation of Fuzzy PID Controller," in *2010 International Forum on Information Technology and Applications*, 2010, vol. 3, pp. 95–98.
- [8] M. Poovizhi, M. S. Kumaran, P. Ragul, L. I. Priyadarshini, and R. Logambal, "Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives by using MATLAB-SIMULINK," in *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 2017, pp. 178–183.
- [9] B. K. Lee and M. Ehsani, "Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles," in *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, 2001, pp. 246–251.
- [10] B. K. Lee and M. Ehsani, "Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles," in *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines*

- and Drives Conference (Cat. No.01EX485)*, 2001, pp. 246–251.
- [11] R. P. Copeland and K. S. Rattan, “A fuzzy logic supervisor for PID control of unknown systems,” in *Proceedings of 1994 9th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1994, pp. 22–26.
  - [12] P. H. Krishnan and M. Arjun, “Control of BLDC motor based on adaptive fuzzy logic PID controller,” in *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, 2014, pp. 1–5.
  - [13] M. Ridwan, *Rancang Bangun Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan ANFIS untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik*, 1st ed. Surabaya: ITS, 2018.

## LAMPIRAN

### a. Rangkaian Simulasi Sistem



.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Pamekasan pada tanggal 21 Agustus 1995. Sebagai anak ketiga dari empat bersaudara, penulis mengawali kegiatan pendidikan formal di SD Negeri Pademawu Barat 3, yang kemudian dilanjutkan di SMP Negeri 1 Pademawu, SMA Negeri 3 Pamekasan dan pada tahun 2014 penulis diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Elektro ITS melalui jalur SBMPTN. Penulis aktif dibidang karya tulis, dan pernah dua kali mendapatkan biaya penelitian dari RISTEKDIKTI untuk PKM, serta pernah menjuarai beberapa LTKI tingkat Nasional di 3 Instansi pendidikan yaitu Badak LNG Academy Bontang, UNAIR dan Gemastik

Ristekdikti. Penulis mendapatkan beasiswa PPA untuk peningkatan prestasi akademik. Selain itu penulis juga pernah menjadi anggota di Divisi Workshop Elektro ITS yang bergerak dibidang pelatihan elektronika. Dibidang kepanitiaan, penulis pernah menjadi Koordinator Wahana Teknologi ITS EXPO 2016.

Penulis dapat dihubungi di :

Email	: agustrywahyudi@gmail.com
Hp/WA	: 087850432808
Instagram	: @agustryw
Line	: @agustryw
Facebook	: Agus Try Wahyudi I
LinkedIn	: Agus Try Wahyudi

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....